

УДК 621.438-226.739.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ БОЛТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

В.Э. МЕДЕНЦОВ¹, М.А. ПЕТРОВА², В.М. САМОЙЛЕНКО²

¹ *Лыткаринский машиностроительный завод, г. Лыткарино, Россия*

² *Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия*

Статья посвящена выбору смазки для применения в болтовых соединениях серийного газотурбинного двигателя типа АЛ-31. В современном газотурбинном двигателе применяются сложные болтовые соединения, работающие в различных условиях. В процессе ремонта болтовые соединения подлежат разборке, однако в результате пригорания происходит увеличение момента страгивания, и они ломаются. На основании проведенного анализа условий эксплуатации выявлены наиболее характерные дефекты болтовых соединений, а также причины их появления. Установлено, что основной причиной поломки болтовых соединений является увеличение момента страгивания болтового соединения. Для уменьшения момента страгивания необходим выбор смазок, позволяющих уменьшить тепловое воздействие на болтовое соединение и предотвратить его поломку в процессе разборки. Для выбора смазки проведен анализ требований, предъявляемых к смазкам для болтовых соединений, работающих при высоких температурах. Выбор смазки проводился по результатам сравнительного исследования применения различных составов смазки в процессе натурных испытаний. Данная научная работа направлена на повышение работоспособности болтовых соединений в широком эксплуатационном диапазоне и предотвращение увеличения момента страгивания при ремонте газотурбинного двигателя. Полученные в процессе натурных испытаний результаты позволяют предложить смазку, которая может быть использована в болтовом соединении, работающем при высоких температурах, и позволяющую уменьшить момент страгивания по сравнению с серийно применяемым.

Ключевые слова: болтовое соединение; момент страгивания; смазка; защитное покрытие; газотурбинный двигатель.

ВВЕДЕНИЕ

В современном газотурбинном двигателе (ГТД) применяется широкий ассортимент резьбовых соединений ввиду их различных конструктивных решений. Для повышения прочности и коррозионной стойкости крепежных деталей применяют различные виды термической и термохимической обработки и нанесение металлических, химических и лакокрасочных покрытий [1, 5, 9]. Например, окисные пленки, создавая сжимающие остаточные напряжения во впадинах резьбы, могут на 4–5 % повысить предел выносливости соединения. Для резьбовых крепежных деталей из конструкционных сталей чаще всего применяют кадмиевое покрытие, а для работающих в среде топлива – цинковое с последующим фосфатированием; для деталей из коррозионностойких сталей (кроме гаек) – химическое пассивирование. Схватывание в резьбовых парах уменьшают покрытием серебром или дисульфидом молибдена. Серебряное покрытие применяют также и для улучшения свинчивания деталей из коррозионностойких сталей. В условиях значительных переменных нагрузок решающее значение приобретает повышение усталостной прочности болтов. В этих условиях раскрытие стыка при недостаточной затяжке приводит к появлению дополнительных напряжений ударного характера и, как следствие, к резкому снижению долговечности элементов соединения [2–5, 9].

Анализ разрушения болтовых соединений после их эксплуатации показал, что во впадине второй нитки резьбы обнаружен продольный дефект с рваными краями, предположительно «задир», и трещина (рис. 1). Исследования показали, что материал болта соответствует требованиям чертежа по химическому составу, твердости [6–9]. Свечение люминофора во впадине второй нитки резьбы обусловлено наличием закатанного надрыва.



Рис. 1. Внешний вид болта с дефектами после эксплуатации и демонтажа
Fig. 1. The appearance of bolt defects after operation and dismantling

Для фратографического анализа болт был надрезан в плоскости трещины (рис. 2) и разрезан в продольном сечении поперек трещины, трещина была вскрыта. Анализ поверхности изломов проводился с помощью стереоскопического микроскопа Stemi 2000C при увеличении $\times 3000$ и растрового электронного микроскопа.

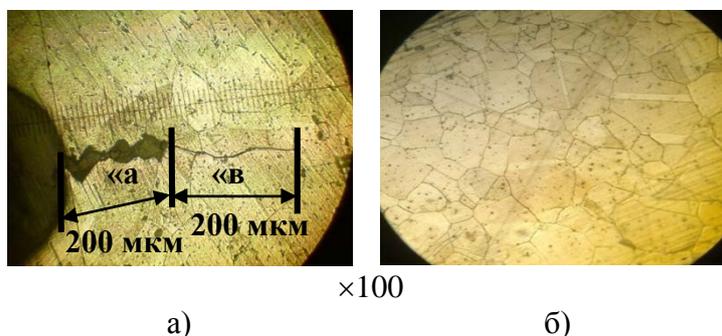


Рис. 2. Микроструктура материала болта: а – в продольном сечении; б – в поперечном сечении
Fig. 2. The microstructure of a bolt material: a) longitudinal section; b) cross section

Обнаружена трещина по впадине резьбы на 2-м витке болта, что соответствует исследованиям авторов [6, 7, 10]. Поверхность излома окислена, излом характерен для статического вязкого разрушения. Металлургических дефектов, следов перегрева материала болта в изломе не обнаружено. Характер трещины соответствует статическому вязкому разрушению. Микроструктура материала (рис. 2, б) характерна для сплава ЭИ-698 после термической обработки (балл зерна 4 по шкале № 1 ГОСТ 5639-82).

Две зоны на трещине образовались в два этапа. Возможно, при монтаже (затяжке болта) образовалась трещина (зона «а»), которая в процессе работы изделия окислилась, при последующем монтаже-демонтаже трещина продолжила развиваться (зона «в») (рис. 2, а). Образование трещины произошло по границам зерна.

Причиной появления надрыва в районе первого-второго витков болта явилось «закусывание» резьбы в результате воздействия крутящего момента при монтаже-демонтаже. Образование задиров и забоин связано с многократными монтажно-демонтажными работами болтового соединения. Кроме того, известно, что распределение сил между витками резьбы, полученное Н.Е. Жуковским для гайки с десятью витками, неравномерно. На первый, наиболее нагруженный виток приходится около $\frac{1}{3}$ общей силы на винт, а на десятый виток – менее $\frac{1}{100}$ общей силы [2, 6, 7, 10]. Проведенные исследования причин разрушения болтовых соединений показали, что основное разрушение происходит по 1...2 витку резьбы, воспринимающие $\frac{1}{3}$ всей нагрузки, приходящей на болт, а также возникающего «спекающегося» контакта резьбы болта и гайки в местах отсутствия смазки.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что научная работа, проводимая по выбору смазки или покрытия для уменьшения момента страгивания болтового соединения после эксплуатации в процессе разборки ГТД, является актуальной [2].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Целью данной работы является определение целесообразности выбора и применения смазочного материала для болтовых соединений, выполненных из сплава ЭИ-698 и работающих при температурах до 500...600 °С.

Очевидно, что резьбовые силовые соединения должны быть затянуты. Незатянутые резьбовые соединения быстро выходят из строя, особенно в условиях циклических и динамических нагрузок вследствие разбивания, наклепа, а иногда и сваривания. Основное условие качественного соединения – обеспечение заданного стабильного усилия затяжки. Его получают, например, путем завинчивания гайки с определенным моментом. Проблема заключается в том, что 60–90 % усилий, прилагаемых к гайке, расходуется на преодоление сил трения в витках резьбы и на торцевых поверхностях. Однако широкий спектр применяемых конструкционных материалов деталей и условия воздействия внешней среды при эксплуатации приводят к варьированию фактического коэффициента трения в довольно широких пределах. В такой ситуации обеспечить нормирование усилия затяжки затруднительно. Это приводит к тому, что при сборке, например, фланцевых сопряжений с большим количеством болтов они будут затянуты неодинаково. В результате возможно не только повреждение перетянутых соединений, но и общая деформация стыка с потерей герметичности из-за неравномерности затяжки. Смазочный материал призван снижать коэффициент трения и обеспечивать его стабильность, позволяя точно контролировать усилие затяжки. Он также защищает резьбовое соединение от агрессивных воздействий внешней среды, сохраняет его работоспособность и позволяет без повреждения разобрать после продолжительной эксплуатации [7, 9, 10].

При эксплуатации резьбовых соединений в условиях экстремально высоких температур (600 °С и более) к смазочным материалам предъявляются особые требования. Они не должны содержать таких металлов, как свинец и цинк. Эти вещества плавятся при относительно низких температурах и, проникая по границам зерен, диффундируют в резьбовую поверхность, вызывая ее охрупчивание и образование трещин. Эти процессы протекают более интенсивно при действии дополнительных напряжений от внешних сил в материале болта.

Кроме того, нужно учитывать, что сборку резьбовых соединений производят при нормальной температуре. Если резьбовое соединение после сборки работает при повышенных температурах, то при различных материалах болта и соединяемых деталей, когда температурная деформация болта меньше температурной деформации деталей, резьбовое соединение испытывает дополнительные (температурные) напряжения.

При использовании резьбовых соединений из жаростойких сплавов с никелем смазочный материал для них не должен содержать серу, фтор, хлор и некоторые другие элементы, которые присутствуют в обычных смазочных материалах. В таких сплавах они образуют соединения с никелем, которые приводят к появлению внутренних напряжений в материале и образованию трещин. Это может привести к внезапному разрушению резьбового соединения и стать причиной аварии. Поэтому обычные смазочные материалы недопустимо применять для смазки деталей резьбовых соединений, изготовленных из сплавов с никелем [2, 8].

Болтовые соединения подвергаются действию влаги, пыли, агрессивных факторов окружающей среды и т. д. Очевидно, что не существует универсального смазочного материала, удовлетворяющего всем возможным требованиям. Выбор резьбовой смазки необходимо осуществлять исходя из конструкции и условий работы конкретного соединения [5–8, 10]. Поэтому были исследованы покрытия, направленные на оказание антифрикционных свойств резьбового соединения. Анализ литературных данных показал, что таким покрытием может быть нитрид бора (BN) [2, 6, 10]. Однако одним из вопросов нанесения нитрида бора является решение его «закрепления» на резьбе. С этой целью были исследованы следующие варианты смазок: масло ИПМ-10 + BN, BN + Нефрас. Для проведения сравнительных испытаний были нанесены также смазки: серийно применяемые ПФМС, АСФХ и масло ВНИИ НП 50. Все варианты были нане-

сены на болты и собраны в соединение по существующей технологии с контролируемым моментом затяжки (рис. 3).

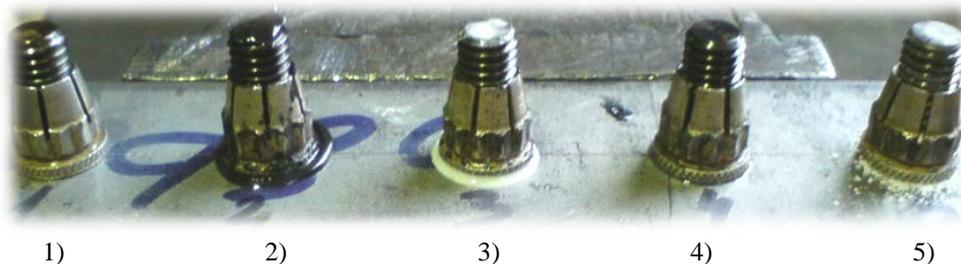


Рис. 3. Внешний вид болтов с нанесенными смазками в собранном соединении с вариантами смазок:
1 – ПФМС; 2 – АСФХ; 3 – ИПМ 10 + ВН; 4 – ВНИИ НП 50; 5 – ВН + Нефрас
Fig. 3. The appearance of the bolts coated with grease in the assembled coupling with the options of greases:
1 – PPMS; 2 – ASPH; 3 – IPM 10 + UNINTERRUPTED; 4 – VНИИ NP 50;
5 – UNINTERRUPTED + Nefras

Собранное соединение было подвергнуто выдержке в открытой печи в течение 24 часов при температуре $t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$. После соединения было разобрано с замером момента страгивания 1) $2,2 \dots 2,7 \pm 0,1$ кгс·м; 2) $2,9 \pm 0,1$ кгс·м; 3) $3,7 \pm 0,1$ кгс·м; 4) $3,4 \pm 0,1$ кгс·м; 5) $1,5 \pm 0,1$ кгс·м.

После разборки соединения установлено, что связка на основе масла не может быть применена, так как при высоких температурах масло коксуется с образованием склеивающей пленки (рис. 4).

После разборки соединения установлено, что связка на основе масла не может быть применена, так как при высоких температурах масло коксуется с образованием склеивающей пленки (рис. 4).

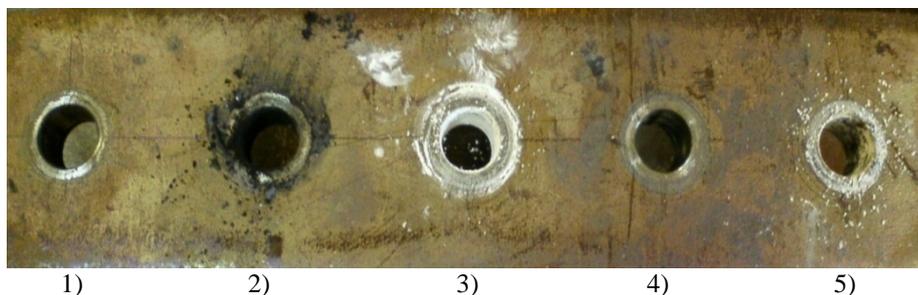


Рис. 4. Внешний вид соединения после разборки болтов с вариантами смазок:
1 – ПФМС; 2 – АСФХ; 3 – ИПМ 10 + ВН; 4 – ВНИИ НП 50; 5 – ВН + Нефрас
Fig. 4. The appearance of the joints after disassembly of the bolts with the options of greases:
1 – PPMS; 2 – ASPH; 3 – IPM 10 + UNINTERRUPTED; 4 – VНИИ NP 50; 5 – UNINTERRUPTED + Nefras

В дальнейшем был продолжен поиск связующей смазки для нанесения нитрида бора, подтверждения ранее полученных положительных результатов с вариантами ВН + Нефрас и АСФХ, а также исследовались другие варианты покрытия. На болты были нанесены следующие варианты смазок.

1. MIG SPRAY – аэрозоль для защиты поверхности металла от брызг (капель) во время сварки.

2. ВН + Нефрас.

3. АСФХ (без сушки $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ и отжига $600\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4. ВН + Акриловая связка.

После нанесения смазок сразу закручивали гайки с моментом затяжки $2,2$ кгс·м, затем выдерживали в печи в течение 24 часов при температуре $t = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$, среда – воздух.

После остывания до комнатной температуры замеряли момент страгивания гайки при откручивании (табл. 1).

Таким образом, из проведенных исследований видно, что наиболее низкий момент страгивания у вариантов смазок АСФХ и ВN + Нефрас.

Для подтверждения полученных результатов и с целью сравнения момента страгивания с серийным покрытием ПФМС на 5 болтов были нанесены следующие варианты смазок: 1) АСФХ (сушка); 2) АСФХ (сушка); 3) ВN + Нефрас; 4) ВN + Нефрас; 5) ПФМС.

После нанесения смазок сразу закручивали гайки (без сушки) на болты с вариантами 3, 4 и 5. На варианты 1 и 2 гайки закручивали после сушки при 200 °С (с моментом затяжки 2,2 кгс·м). Затем собранное соединение выдержали в печи в течение 54 часов при температуре $t = 500$ °С, среда – воздух. После остывания до комнатной температуры замерили момент страгивания гайки при откручивании (табл. 1). Видно, что продолжительность выдержки при температуре 500 °С увеличивает момент страгивания гайки при раскрутке всех вариантов.

Все обобщенные результаты по проведенным исследованиям различных вариантов покрытий представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Результаты замера момента страгивания
Measurement results of breakaway moment

Номер болта	Вариант покрытия	Момент страгивания после 24 часов	Момент страгивания после 54 часов
20	ПФМС	2,2...2,7±0,1 кгс·м	№ 4 3,9±0,1 кгс·м
24	АСФХ сушка 200°С	2,9 ±0,1 кгс·м	№ 12 5±0,2 кгс·м № 10 3,6±кгс·м
14	ИПМ 10 + ВN	3,7±0,1 кгс·м	
11	ВНИИ НП 50	3,4±0,1 кгс·м	
8	ВN + Нефрас	1,5±0,1 кгс·м 2,2±0,1 кгс·м	№ 1 4±0,1 кгс·м № 54 3±кгс·м
28	АСФХ (сушка 200 °С + отжиг 600 °С) без выдержки в печи при 500 °С	1,9±0,1 кгс·м	
22	АСФХ (сушка + отжиг при 600 °С)	3,5±0,2 кгс·м	
14	MIG SPRAY	4,1±0,1 кгс·м	
11	ВN + Нефрас	2,2±0,1 кгс·м	
8	АСФХ (без сушки 200°С и отжига 600 °С)	3,6±0,1 кгс·м	
20	ВN + Акриловая связка	4,0±0,3 кгс·м	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Нанесение смазки ВN + Нефрас позволило уменьшить момент страгивания в 1,2...1,4 раза по сравнению с серийной смазкой ПФМС.
2. Применение покрытия АФХС показало результаты на уровне серийно применяемого покрытия ПФМС.
3. Увеличение продолжительности выдержки при температуре приводит к увеличению момента страгивания во всех вариантах исследуемых смазок.
4. Масло в качестве связки не может быть применено, так как в процессе температурного воздействия коксуется и образует склеивающую пленку, приводящую к увеличению момента страгивания.

5. В качестве смазки для болтовых соединений на ГТД, подвергающимся частой разборке в процессе их длительных испытаний, целесообразно использовать смазку BN + Нефрас.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 11708-82. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1987.
2. Дунаев П.Ф., Леликов О.П. Конструирование узлов и деталей машин: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2009. 496 с.
3. Повышение коррозионной стойкости конструкционной стали 30ХГСН2А путем имплантации ионов меди и свинца / В.В. Овчинников, Ю.М. Боровин, Е.В. Лукьяненко, С.В. Якутина, Д.А. Козлов, О.А. Парфеновская // Машиностроение и инженерное образование. 2013. № 3. С. 35–41.
4. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. М.: Машиностроение, 2008. Т. 4. 200 с.
5. Павлов А.Ю., Парфеновская О.А. Технология материалов и покрытий: учебное пособие. М.: МГИУ, 2015. 138 с.
6. Никитин А.Н., Серебренников Г.З. Технология сборки и автоматизация производства воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1992. 368 с.
7. Ильянков А.И., Левит М.Е. Основы сборки авиационных двигателей. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
8. Fisher J.W., Struik J.H.A. Guide to design criteria for bolted and riveted joints. John Wiley and Sons. Inc., 1974.
9. Standard handbook of fastening and joining. Ed. by Robert O. Parmeley. McGraw-Hill Book Company, 1977.
10. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учебник для студентов специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки». Серия: «Газотурбинные двигатели». М.: Машиностроение, 2007. 232 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Меденцов Виктор Эдуардович, ведущий инженер-металловед, Лыткаринский машиностроительный завод филиал ПАО «УМПО», medentsovve@gmail.com.

Петрова Мария Александровна, аспирантка МГТУ ГА, kleopa90@mail.ru.

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

RESEARCH OPPORTUNITIES TO IMPROVE THE HEALTH OF THE BOLTED JOINTS OF GAS TURBINE ENGINE

Victor E. Medentsov¹, Maria A. Petrova², Vasily M. Samoilenko²

¹ *Lytkarinsky machine-building plant, Lytkarino, Russia*

² *Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The article considers the choice of the lubricants for using in the bolted joints of the serial gas-turbine engine AL-31. In a modern gas turbine engine complex bolted joints operating in various conditions are used. They are subject to

demolition in the repair process, in which they break as the result of burning and thus the increase of the breakaway moment. On the basis of maintenance conditions analysis there were determined the most characteristic defects in bolted joints, as well as the reasons for their occurrence. It was established that the main cause of failure of bolted joints is the increase breakaway moment of bolted joint. To reduce the breakaway moment one should choose such lubricants as to reduce the thermal influence on the bolt and prevent it from being destroyed in the disassembly process. For choosing lubrications the analysis of the requirements for lubricants for bolted joints used at high temperatures was conducted. Lubricants choice was made based on the results of a comparative study of various compositions of lubricant application in the process of field testing. This research work is aimed to improve the efficiency of bolted connections in a wide operating range and to prevent the increase breakaway moments in gas-turbine engine repair. Obtained in the process of field testing results allow to suggest a lubricant that can be used in the bolt connection operating at high temperatures and to reduce the breakaway moment compared to the commercially used one.

Key words: bolted joint; breakaway moment; lubricants; protective coating; gas-turbine engine.

REFERENCES

1. GOST 11708-82. *Osnovnyie normyi vzaimozamenyaemosti. Rezbа. Terminyi i opredeleniya* [Basic norms of interchangeability. Thread. Terms and definitions]. Moscow, *Izdatel'stvo standartov*, 1987. (in Russian)
2. **Dunaev P.F., Lelikov O.P.** *Konstruirovaniye uzlov i detaley mashin* [Of Design of units and parts of machines]. Proc. a manual for students of higher educational inst. proc. institutions. M.: Publishing center "Academy". 2009. 496 p. (in Russian)
3. **Ovchinnikov V.V., Borodin Y. M., Luk'yanenko E.V., Yakutina S.V., Kozlov D.A., Parfenovskaya O.A.** *Povyishenie korrozionnoy stoykosti konstruktсионnoy stali 30KHGSN2A putyom implantatsii ionov medi i svintsa* [Improving the corrosion resistance of structural steel 30KHGSN2A by implanting ions of copper and lead]. Scientific and technical journal "Mechanical Engineering and Engineering Education", 2013, no. 3, pp. 35–41.
4. **Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L.** *Osnovnyi konstruirovaniya aviatsionnyih dvigateley i energeticheskikh ustanovok* [Fundamentals of design of aircraft engines and power installations]. M., Mechanical Engineering, 2008, vol. 4. 200 p. (in Russian)
5. **Pavlov A.Yu., Parfenovskaya O.A.** *Tehnologiya materialov i pokryitiy* [Technology of materials and coatings]. M., MGIU, 2015, 138 p. (in Russian)
6. **Nikitin A.N., Serebrennikov G.Z.** *Tehnologiya sborki i avtomatizatsiya proizvodstva vozdušno-reaktivnyih dvigateley* [Assembly Technology and automation of production jet engines]. M., Mechanical Engineering, 1992, 368 p. (in Russian)
7. **Ilyenkov A.I., Levit M.E.** *Osnovnyi sborki aviatsionnyih dvigateley* [Basis for the Assembly of aircraft engines]. M., Mechanical Engineering, 1987, 288 p. (in Russian)
8. **Fisher J.W., Struik J.H.A.** *Guide to design criteria for bolted and riveted joints*. John Wiley and Sons. Inc., 1974.
9. *Standard handbook of fastening and joining*. Ed. by Robert O. Parmeley. McGraw-Hill Book Company, 1977.
10. **Inozemtsev A.A., Nihamkin M.A., Sandratskiy V.L.** *Osnovnyi konstruirovaniya aviatsionnyih dvigateley i energeticheskikh ustanovok* [Fundamentals of design of aircraft engines and power plants]. The textbook for students of the specialty "Aircraft engines and power plants". Series: "gas Turbine engines". M., Mechanical Engineering, 2007, 232 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Victor E. Medentsov, Leading Engineer-Metallurgist, Lytkarinsky Machine-Building Plant, Branch of JSC "UMPO", medentsovve@gmail.com.

Maria A. Petrova, Postgraduate Student of MSTUCA, kleopa90@mail.ru.

Vasily M. Samoilenko, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, the Head of Aviation-Fuel Supply and Repair of Aircraft Chair, MSTUCA, v.samoilenko@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 05.02.2017
Принята в печать 27.04.2017

Received 05.02.2017
Accepted for publication 27.04.2017